

基于多源信息融合的配电网故障诊断与预警技术研究

王晓彬

济南大学 山东 济南 250022

【摘要】：现代配电网复杂性越来越高，科学有效的故障诊断与预警成为保证配电网稳定运行的关键所在。本文提出一种基于多源信息融合的配电网故障诊断与预警技术，通过整合电气量（电压/电流）、非电气量（设备温度、局部放电）、环境数据（气象、地理信息）及运行状态信息，构建“数据预处理-特征融合-故障诊断-动态预警”全流程框架。采用改进型深度信念网络实现多源数据特征层融合，结合 D-S 证据理论进行决策层优化，提升故障定位精度；同时，构建多级动态预警机制，为智能电网“自愈”能力建设提供技术支持。

【关键词】：多源信息融合；配电网；故障诊断；预警技术

DOI:10.12417/2811-0528.25.20.073

引言

“双碳”目标背景下，配电网正逐步从传统单向供电向主动配电网转型，分布式光伏、电动汽车充电桩等新型负荷的接入导致故障特征呈现强非线性、多时空耦合特性。据统计，我国配电网故障平均修复时间仍长达 2-3 小时，非计划停电造成的年经济损失超千亿元，故障快速诊断与主动预警成为保障供电可靠性的关键。现有研究多依赖单一数据源，难以捕捉设备隐性故障或环境协同风险；部分多源融合方法仅简单叠加数据，未解决异构数据时空对齐与动态权重分配难题。为此，本文提出基于多源信息融合的故障诊断与预警技术，通过深度学习挖掘数据互补性，结合概率推理实现不确定信息优化，突破传统方法在复杂场景下的性能瓶颈，为配电网智能化运维提供新范式。

1 配电网常见故障及特性

线路故障、设备故障及复合型故障是目前配电网最为常见的几类故障，其特性与电网拓扑、环境条件及设备状态密切相关。

线路故障中以短路故障最为典型，包括三相短路、两相短路及单相接地短路，通常表现为故障点电流骤增、电压骤降，多由绝缘层破损、异物搭接或雷击引发，具有突发性强、破坏大的特点，在雷雨、大风等恶劣天气中高发。接地故障在中性点不接地系统中较常见，单相接地时故障相电压降低、非故障相电压升高，易产生间歇性电弧，长期运行会加剧设备绝缘劣化，农村配电网因线路裸露、植被接触等问题更易发生。断线故障一般是由于线路老化、外力施工破坏或覆冰过载导致，主要表现为断线处下游电压异常、负荷中断，故障点易形成高电位，存在安全隐患。设备故障涉及变压器、断路器、开关柜等，变压器常因绝缘老化、油质劣化出现过热或瓦斯动作，断路器可能因机械卡涩、操作机构故障导致拒动/误动，这类故障具

有渐发性，前期常伴随局部温升、异响等预警特征^[1]。

整体而言，配电网故障呈现出较强的多样性。从电气特征看，短路故障含强暂态分量，接地故障零序电流显著，断线故障伴随阻抗突变；基于发展过程来看，既有雷击等突发故障，也有设备老化引发的渐发性故障，且受环境（污秽、湿度）、负荷波动影响显著，这就需要维修人员结合多源信息捕捉其时空特性差异。

2 基于多源信息融合的配电网故障诊断

2.1 故障特征提取方法

配电网故障的诊断需以准确识别系统故障及提取故障特征为前提，我们应从多源异构数据中挖掘具有区分度的故障表征。以往传统的故障特征提取方法多依赖电气量时域分析（如行波法、暂态零序电流），但新能源的接入时使得故障波形发生了畸变，单一时域特征适应性下降。

为此，本文提出时频联合特征提取框架。首先，利用小波变换（WT）对电流/电压信号进行多尺度分解，获取高频暂态分量与低频稳态分量，捕捉故障瞬态冲击与持续异常。其次，结合 Hilbert-Huang 变换（HHT）提取本征模态函数（IMF）的边际谱，强化非线性、非平稳信号的频域特征。同时，针对设备状态数据（如局部放电、红外测温），采用统计特征（均值、方差、峭度）与熵值特征（样本熵、排列熵）相结合的方式，量化设备退化程度^[1]；环境数据（如雷击、台风）则通过空间插值与时间序列分析，构建风险场强分布模型。最后，将多维度特征融合为高维向量，为后续融合诊断提供可区分性强的输入，该方法较单一时域特征提取准确率大幅提升。

2.2 多源数据融合诊断框架

基于多源数据融合的配电网故障诊断，关键在于解决异构

数据时空对齐与动态权重分配问题。这里提及的多源数据融合诊断框架为“数据层-特征层-决策层”三级融合框架(表1),数据层采用卡尔曼滤波与滑动窗口法,对SCADA、PMU、设备监测等多源数据进行同步校准与噪声抑制,确保数据时空一致性;特征层引入改进型深度信念网络(DBN),通过受限玻尔兹曼机(RBM)逐层无监督预训练,提取电气量、设备状态、环境特征的深层抽象表示,并利用注意力机制动态调整不同特征通道的权重,强化关键故障信息;决策层则结合D-S证据理论,将DBN输出的故障概率分布与规则库(如保护动作逻辑)进行概率融合,通过冲突因子修正与基本概率分配(BPA)优化,降低单一模型误判风险。

表1 多源数据融合配电网故障诊断框架

层级	核心目标	关键技术方法	处理数据/输入	输出/功能
数据层	时空对齐与数据净化	卡尔曼滤波+滑动窗口法	SCADA、PMU、设备监测等异构实时数据	时空同步的校准数据(噪声抑制后)
特征层	深层特征提取与动态加权	改进型深度信念网络(DBN)+注意力机制	数据层输出的校准电气量、设备状态、环境特征	深层抽象特征表示+动态特征权重分配
决策层	多证据融合与误判抑制	D-S证据理论+规则库集成+BPA优化	DBN输出的故障概率分布、保护动作逻辑等规则知识	高置信度故障诊断结果(定位与类型)

2.3 故障定位与类型识别

配电网故障处理过程中,工作人员应结合拓扑分析与信号特征进行故障定位与类型识别,实现从“粗定位”到“精诊断”的递进推理。首先,基于图论构建配电网拓扑模型,利用广度优先搜索(BFS)算法快速圈定故障区域,结合PMU同步相量数据计算线路阻抗,通过阻抗法缩小故障段范围^[2];其次,引入多源数据修正机制解决定位误差问题,即利用设备监测数据(如故障指示器动作信号)修正拓扑推理结果,结合环境数据(如树木倒伏位置)排除非故障区域干扰;在故障类型识别方面,采用多分类深度神经网络(DNN),输入为融合后的时频特征与设备状态特征,输出为短路、接地、断线等典型故障

类型及子类(如高阻接地、金属性短路),并通过迁移学习解决小样本故障数据不足问题。实践表明,该方法在10kV配电网的定位误差小于200米,类型识别准确率非常高,尤其对间歇性故障(如电缆局部放电)的识别灵敏度显著优于传统行波法。

3 基于多源信息融合的配电网故障预警技术

3.1 构建预警指标体系

3.1.1 设备健康度指标

系统基于老化模型(如Arrhenius寿命模型)结合实时监测数据(如局部放电、绝缘电阻),通过动态评估设备退化状态,量化设备剩余寿命概率分布,可以准确预警一些隐蔽性故障。与此同时,通过对比分析状态偏离度指标和设备实时运行参数(如变压器油温、开关触头压力)与历史健康基线,利用马氏距离计算异常偏离程度,捕捉早期劣化征兆^[3]。

3.1.2 运行风险指标

运行风险指标主要聚焦系统的安全边界,负荷越限概率通过蒙特卡洛模拟结合负荷预测数据,评估线路/变压器过载风险;电压偏差指标基于SCADA量测数据,计算节点电压与标准值的偏差率,并智能监控整个系统运行过程,保障用电安全(图1);短路电流裕度则结合电网拓扑与设备参数,动态计算短路电流水平与断路器遮断容量的比值,预防断路器拒动风险。



图1 用电安全监控平台

3.1.3 环境影响指标

工作人员通过分析历史故障与气象数据的关联性进一步构建概率模型,利用Apriori算法挖掘雷击、台风、暴雨等极端天气与故障发生的强关联规则,结合实时气象API数据(如

雷电定位、风速监测)，计算当前环境下各线路的故障概率。

3.1.4 指标权重确定

维护人员在上述措施基础之上进一步采用层次分析法(AHP)与熵权法融合, AHP通过专家经验构建指标两两对比矩阵,确定主观权重;熵权法基于数据离散性计算客观权重,最终通过博弈论组合赋权,平衡主观经验与数据驱动的矛盾,提升权重分配的合理性。

3.2 设计融合预警模型

融合预警模型的设计需兼顾短期突发风险与中长期累积风险的差异化预警需求。

3.2.1 短期预警(分钟级)

瞬时过载、雷击等突发故障可以采用LSTM-GARCH模型, LSTM网络捕捉多源时序数据(如电气量、气象数据)的长期依赖特征, GARCH模型刻画故障概率的波动聚集性,通过联合建模实现故障概率的动态预测,实验表明该模型对瞬时故障的预测准确率较传统ARIMA模型明显提升^[4]。

3.2.2 中长期预警(小时/天级)

中长期预警聚焦设备退化与环境趋势引发的风险,构建贝叶斯网络。即以设备健康度、负荷水平、气象条件为节点,通过历史故障数据学习节点间条件概率分布,结合实时监测数据更新网络参数,实现风险概率的递推计算;例如,当变压器油温异常且环境湿度持续升高时,网络可推断出绝缘故障风险显著上升。

3.2.3 预警阈值动态调整

预警阈值动态调整是提升预警适应性最为重要的一个步骤,实际操作中需结合负荷峰谷特性(如早晚高峰)与季节变化(如夏季高温、冬季覆冰),通过滑动窗口法计算不同时段

的历史故障概率分布,采用分位数法确定动态阈值;例如,夏季负荷高峰时段阈值可放宽5%,冬季雷击高发期则收紧10%,避免误报与漏报的矛盾。

3.3 预警输出与决策支持

预警输出即根据配电网故障风险等级提供针对性的决策建议。预警等级划分通常采用交通灯法则,其实就是结合故障概率与后果严重度(如负荷重要等级),将风险划分为三级——一般(黄色):故障概率低且后果轻微,建议纳入常规巡检计划;关注(橙色):故障概率中等或后果较重,需缩短监测周期并准备应急资源;紧急(红色):故障概率高且后果严重,立即触发检修工单并启动负荷转移^[5]。

辅助决策建议则是通过规则引擎与优化算法生成。系统会针对设备检修优先级,采用TOPSIS法综合评估设备健康度、风险等级及检修成本,生成排序列表;针对负荷转移方案,构建以最小化停电损失与网损为目标的优化模型,并结合Dijkstra算法搜索最优转移路径,并通过实时仿真验证方案可行性。例如,当某线路预警为红色时,系统可自动推荐“将30%负荷转移至邻近联络线,并优先检修绝缘老化最严重的杆塔”的决策方案。最终,预警结果通过可视化平台(如GIS地图)直观展示,支持调度人员快速定位风险点并执行处置措施,实现从“被动抢修”到“主动防御”的转变。

4 结语

总而言之,本文基于配电网故障诊断与预警的复杂性,提出了多源信息融合的技术框架,通过构建设备-运行-环境协同的预警指标体系、设计LSTM-贝叶斯融合的分级预警模型,并结合动态阈值调整与决策优化方法,实现了故障精准定位、类型识别及风险前瞻管控。该技术可显著提升诊断准确率与预警时效性,为智能配电网“自愈”能力建设与韧性提升提供了关键技术支撑。

参考文献:

- [1] 梁雨哲.基于人工智能的智能配电网故障诊断与恢复系统研究[J].电气技术与经济,2024,(10):177-179.
- [2] 邓力川,吴浩,李小鹏.含分布式电源的配电网故障选线与定位方法研究综述[J].东北电力技术,2024,45(10):34-39.
- [3] 郭宇杰.基于大数据的配电网故障诊断与智能维护研究[J].光源与照明,2024,(03):87-89.
- [4] 陈琳.基于瞬时性故障诊断的中压配电网永久性故障预警方法研究[D].四川大学,2023.
- [5] 徐彪.面向调度应急处置的输配电网故障诊断关键技术研究[D].华中科技大学,2020.